Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article

Vol. 13, No. 4, 2023, p. 509-520

Feasibility of Soil Texture Determination Using Acoustic Signal Processing of a Cone Penetrometer

J. Nasrollahi Azar[1], R. Farrokhi Teimourlou[2*], V. Rostampour[2]

1- PhD Student, Department of Mechanical Enginering of Biosystem, Urmia University, Urmia, Iran
2- Associate Professor, Department of Mechanical Enginering of Biosystem, Urmia University, Urmia, Iran
(*- Corresponding Author Email: r.farrokhi@urmia.ac.ir)

Received: 22 September 2022 Revised: 14 January 2023 Accepted: 22 January 2023 Available Online: 22 January 2023	**How to cite this article:** Nasrollahi Azar, J., Farrokhi Teimourlou, R., & Rostampour, V. (2023). Feasibility of Soil Texture Determination Using Acoustic Signal Processing of a Cone Penetrometer. *Journal of Agricultural Machinery, 13*(4), 509-520. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2023.78870.1126

Introduction

Precision agriculture is a modern approach to farming that ensures the crops and soil receive exactly what they need for optimum health and productivity. Precision agriculture offers the potential to automate and simplify the collection and analysis of information. It allows management decisions to be quickly made and implemented in small areas of larger fields. Measuring acoustic signals with a cone penetrometer is an advanced and inexpensive method that provides a lot of information about the soil within the shortest amount of time and with the lowest cost. The texture of the soil determines the percentage of the constituents of the mineral part of the soil such as sand, silt, and clay.

In this study, an acoustic penetrometer is developed to provide an accurate method for determining the soil texture. This system uses a microphone to record the sound produced by the cone-soil contact and correlates this data with the soil texture.

Materials and Methods

An acoustic cone penetrometer (ACPT) was designed to determine if there is a relationship between the sound produced at the cone-soil contact and soil particle size. Three types of cones with angles of 30, 45, and 60 degrees, diameter of 20.27 mm, and rod length of 300 mm according to ASAE standard S313.3 FEB1999ED (R2013) were used to determine the relationship between sound and soil texture and to choose the best angle. A microphone (20-20,000 Hz) suitable for fast dynamic responses was used to record the audio signals produced from the soil. Audio signals were stored online through the oscilloscope section of Matlab software. To create the controlled vertical movement of the cones, a mechanical mechanism with electronic controllers was designed. This mechanism can be connected to the rails of the soilbin available in Urmia University, Iran, and is made of a 5 hp electric motor with a gearbox, an inverter for controlling the rotational speed of the electric motor, and a digital ruler for recording vertical movement. Soil samples were tested in 19-liter bins.

Acoustic signals received from the microphone were processed in the time-frequency domain using wavelet transform. In this research, Daubechi function type 3 is used to analyze acoustic signals. It is not possible to use the processed acoustic signals directly for statistical analysis. Therefore, the relevant features should be extracted from them. From the 30 features of time domain signals, the most effective and main features include: SUM, Max, RMS, average, Var, kurtosis, and Moment4. They were ranked using the feature selection section of WEKA 3.9.2 software to avoid increasing the volume of calculations, increase processing speed, and reduce errors. The characteristic vector of the sub-signals of several different soil samples was analyzed to distinguish the soil type and constituents namely sand, silt, and clay.

https://doi.org/10.22067/jam.2023.78870.1126

Results and Discussion

The best type of cone was selected using WEKA software. The number of features in the d1 sub-signals was higher for the 45-degree cone, and it can be concluded that with this cone, the soil type can be better recognized.

The average values of characteristics in clay, loam, and sand had an increasing trend, respectively, and were statistically significant with a probability of 1% and 5%.

Acoustic signals for clay soil, which has a heavy texture and small particles, have minimum amplitude, and for loamy and sandy soils, they were observed as medium and maximum, respectively. This will cause the values of the selected features of clay soil to be low, and as a result, the average values, variance, and standard deviation are also low. They would be higher for loamy and sandy soil which have larger particles. It can be deduced that, as the size of the soil particles increases, the particles hitting the cone wall would become heavier and would affect the frequency and amplitude of the signal. This will result in the increase of signal amplitude values and, the sum, max, and mean values as well.

Conclusion

Among the sub-signals, the maximum effect of soil texture type changes was related to d1 sub-signals for the 45° cone, and these signals had more potential to identify the soil texture type. Among the features, the sum, average, VAR, and RMS were significant at 1% probability levels. Therefore, these features have more potential to detect the type of soil texture in the mentioned sub-signal. Additionally, the effect of soil texture change on Moment and Kurtosis characteristics was significant at 5% probability levels.

Keywords: Cone penetrometer, Microphone, Signal processing, Sub-signal, Wavelet transform

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۳، شماره ٤، زمستان ۱٤۰۲، ص ۵۲۰-۵۰۹

امکان‌سنجی تعیین بافت خاک با استفاده از پردازش سیگنال‌های صوتی یک نفوذسنج مخروطی

جعفر نصرالهی آذر[۱]، رحمان فرخی تیمورلو[۲*]، وحید رستم پور[۲]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۳۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۲

چکیده

بافت خاک یکی از خصوصیات مهم خاک است که با بسیاری از جنبه‌های عملکرد خاک، از بهره‌وری تا سهولت خاک‌ورزی، در ارتباط است. در حال حاضر، تعیین بافت خاک به دو صورت انجام می‌گیرد: در سطح مزرعه با دقت کم یا در محیط آزمایشگاهی و زمان‌بر. در این مطالعه به توسعه یک سیستم جدید برای تعیین بافت خاک در محل مورد نظر، با استفاده از یک نفوذسنج مخروطی با سه زاویه مخروط ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه پرداخته شد. نفوذسنج مجهز به یک میکروفون بود که در آن صدای حاصل از اصطکاک مخروط-خاک برای تعیین بافت خاک استفاده شد. برای تشخیص سه نوع بافت خاک که شامل رس، شن و لوم بود، از روش آنالیز سیگنال‌های صوتی در حوزه زمان- فرکانس (تبدیل موجک) استفاده گردید. تجزیه سیگنال‌ها در ۵ سطح انجام شد و ویژگی‌های مجموع (SUM)، ریشه میانگین مربعات (RMS)، واریانس Var، کشیدگی (kurtosis) و ممان‌های مرتبه بالا Moment4 مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که زیر سیگنال‌های جزئیات اول مخروط ۳۰ و ۶۰ درجه، جزئیات سوم مخروط ۶۰ درجه، جزئیات چهارم مخروط ۶۰ درجه و آپروکسیمت مخروط ۴۵ و ۶۰ درجه به‌ترتیب دارای بیشترین توانایی و اولویت برای تشخیص نوع بافت خاک از یکدیگر می‌باشند. در بین ویژگی‌های بررسی‌شده به‌ترتیب ویژگی‌های مجموع، واریانس، ممان، کشیدگی و ماکزیمم برای تشخیص نوع خاک با سطح احتمال ۱٪ دارای اولویت هستند. مقادیر همه این ویژگی‌ها با افزایش اندازه ذرات خاک از رس تا شن افزایش یافت. تکنیک صوت دارای پتانسیل خوبی جهت تشخیص نوع بافت خاک بود.

واژه‌های کلیدی: پردازش سیگنال، تبدیل موجک، زیر سیگنال، شاخص مخروطی، میکروفون

مقدمه

مدیریت محصول و خاک در سطح کوچک یا همان کشاورزی دقیق، در حال حاضر انقلابی در شیوه‌های مدیریت و استفاده بهتر از مزرعه ایجاد کرده است. نوع بافت یک خاک می‌تواند تاثیرات گسترده‌ای بر ویژگی‌های خاک مانند شکل‌پذیری، نفوذپذیری، سهولت خاک‌ورزی، حاصلخیزی و بهروری داشته باشد (Sun *et al.*, 2011). بافت خاک تعیین‌کننده درصد اجزای تشکیل‌دهنده بخش معدنی خاک یعنی شن، سیلت و رس است که با توجه به درصد هر جزء، کلاس بافتی خاک مشخص می‌شود. سیستم USDA اندازه ذرات خاک رس تا ۲ میکرومتر، خاک لوم در محدوده ۵۰-۲ میکرومتر و اندازه ذرات شن بین ۵۰ میکرومتر تا ۲ میلی‌متر طبقه‌بندی می‌کند. ذرات خاک بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر به‌طور معمول به‌عنوان شن شناخته می‌شوند و در طبقه‌بندی خاک‌ها نادیده گرفته می‌شوند (Posadas, Giménez, Bittelli, Vaz, & Flury, 2001). در حال حاضر، بافت خاک یا از طریق حدس بر اساس احساس یک نمونه در دست، یا در آزمایشگاه با کار گسترده تعیین می‌شود. تعیین بافت خاک در مزرعه نیز یک اندازه‌گیری واقعی نیست، بلکه یک تخمین است (Tate, 2016). با وجود اهمیت زیاد سیگنال‌های صوتی در تعیین بافت خاک، به استفاده و بهبود آن توجه کمتری شده است.

اندازه‌گیری سیگنال‌های صوتی با استفاده از میکروفون تعبیه‌شده در یک نفوذسنج مخروطی برای آزمایش نفوذ ژئوتکنیکی لایه زیرین به اوایل دهه ۱۹۸۰ برمی‌گردد. این نفوذسنج‌های مخروطی ژئوتکنیکی شبه‌استاتیک (مساحت پایه مخروطی ۱۰ سانتی‌مترمربع و

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: r.farrokhi@urmia.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2023.78870.1126

زاویه نوک مخروطی ۶۰ درجه) مقاومت در برابر نفوذ نوک مخروط و اطلاعات صوتی را برای ارائه اندازه دانه و ماهیت نوع خاک اندازه‌گیری کردند (Tringale, 1983). این نفوذسنج مخروطی صوتی با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی و آزمایش‌های مزرعه‌ای، توانست نتایجی را از تجزیه و تحلیل دامنه و محتوای فرکانس سیگنال صوتی به‌دست آورد. رابطه بین مقدار ریشه میانگین مربعات دامنه و نرخ نفوذ مخروط، مقاومت در برابر نفوذ، اندازه متوسط دانه و رطوبت خاک تعیین شد.

در یک مطالعه که یک نفوذسنج مخروطی صوتی افقی برای تشخیص تراکم لایه خاک در سطل آزمایش شد. نتیجه این بود که یک لایه سخت فشرده‌تر می‌تواند سطح صدای بالاتری را ایجاد کند (Grift, Tekeste, & Raper, 2005).

در یک مطالعه تجربی، آزمایشاتی را با یک نفوذسنج مخروطی صوتی برای تعیین همبستگی بین سیگنال صوتی و ویژگی‌های خاک انجام دادند. مشخص شد که محدوده ۲۵-۱۳ کیلوهرتز با خصوصیات خاک ارتباط دارد (Houlsby & Ruck, 1998).

در مطالعه دیگر یک نفوذسنج مخروطی صوتی برای پیدا کردن رابط بین ذرات خاک در یک محیط آزمایشگاهی استفاده شد. به جای استفاده از تبدیل فوریه سریع (FFT) از روش تبدیل هیلبرت-هوانگ (HHT) استفاده شد، مشخص شد که این روش با وجود دقت، بسیار پیچیده است. آن‌ها دریافتند که مقدار مجموع میانگین مربعات (RMS) با مقدار صدا تولیدی به میزان مشخصی مرز میان ذرات را نشان می‌دهد (Chang, Chang, Nguyen, & Wang, 2010).

در تحقیقی مشابه، همت و همکاران (Hemmat, Rahnama, & Vahabi, 2014)، میکروفون‌ها را در دو تا از سه نوک افقی قرار دادند و رابطه بین حالت‌های شکست خاک و پاسخ صوتی را بررسی کردند. مشخص شد که چگالی طیفی توان در مواردی که شکست خاک با فشار رخ می‌دهد در مقایسه با خاک سست به‌طور قابل‌توجهی بالاتر بود.

میثمی و همکاران تحقیقی در مورد اثرات رطوبت خاک بر انتشار سیگنال‌های صوتی انجام دادند. مشخص شد که با افزایش رطوبت، دامنه و قدرت سیگنال افزایش می‌یابد. اعوجاج هارمونیک کل و نسبت سیگنال به نویز هر دو رابطه درجه دوم را با رطوبت خاک نشان دادند (Meisami-asl, Shari, Mobli, Eyvani, & Alimardani, 2013).

نادری بلداجی و همکاران (Naderi-Boldaji, Tekeste, Nordstorm, Barnard, & Birrel, 2019) یک حسگر شامل یک نفوذسنج مخروطی عمودی، یک حسگر پیزوالکتریک انتشار صوت (AE) در فرکانس بالا و یک سنسور دی‌الکتریک خازنی برای مشخصه‌های فیزیکی خاک توسعه دادند. ارزیابی‌های حسگر نشان داد که طیف توزیع فرکانس صوتی به‌دست‌آمده از تبدیل فوریه بافت خاک شنی را از بافت‌های خاک رس و لوم متمایز می‌کند. با این حال، استفاده از حسگر پیزوالکتریک انتشار صوتی (AE) و سیستم جمع‌آوری داده‌ها با نرخ نمونه‌برداری بالا، هنوز یک فناوری گران‌قیمت با محدودیت‌های فنی زیاد است.

تعیین بافت خاک در مزرعه یک اندازه‌گیری دقیق نیست، بلکه یک برآورد است. در حالی‌که بسیاری از مطالعات در مورد بررسی خواص مختلف خاک وجود دارد، تعداد کمی رابطه مستقیم بین فرکانس صدای تولیدی با بافت خاک وجود دارد. کسانی که با نفوذسنج‌های مخروطی صوتی آزمایش انجام داده‌اند، پی برده‌اند که داده‌های ارزشمندی را می‌توان ارائه داد، اما نتوانسته‌اند آن‌ها را از مرحله اثبات مفهوم فراتر ببرند. یک نفوذسنج صوتی به‌منظور ارائه یک روش قوی‌تر برای تعیین سه نوع بافت خاک درجا و بلادرنگ توسعه داده شد. این سیستم پس از ضبط صدای تولیدشده از طریق ارتباط شاخص مخروطی با خاک، داده‌ها را با بافت خاک مرتبط می‌سازد.

مواد و روش‌ها

فرآیند تحقیق و تهیه نمونه

از روش آنالیز سیگنال صوتی برای تشخیص نوع بافت خاک در سه نوع خاک با بافت مشخص استفاده شد. در این تحقیق آزمایش نفوذ عمودی به‌صورت آزمایشگاهی در بافت‌های خاک رس، لومی و شنی انجام شد. ترکیب بافتی و رطوبت خاک‌های آزمایش‌شده در جدول ۱ نشان داده شده است. خاک‌ها از مزارع استان آذربایجان‌غربی با ارتفاع ۱۴۶۰ متر، طول ۴۵/۱۴ درجه شرقی و عرض ۳۶/۴۷ درجه شمالی جمع‌آوری شد و در غربال با اندازه قطر سوراخ ۵ میلی‌متر الک شد و رطوبت برای هر نمونه با قرار دادن مقدار وزنی ظروف مخصوص در کوره ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد محاسبه شد. میزان رطوبت بر اساس رطوبت پایه (wet-basis) محاسبه شد.

تجهیزات

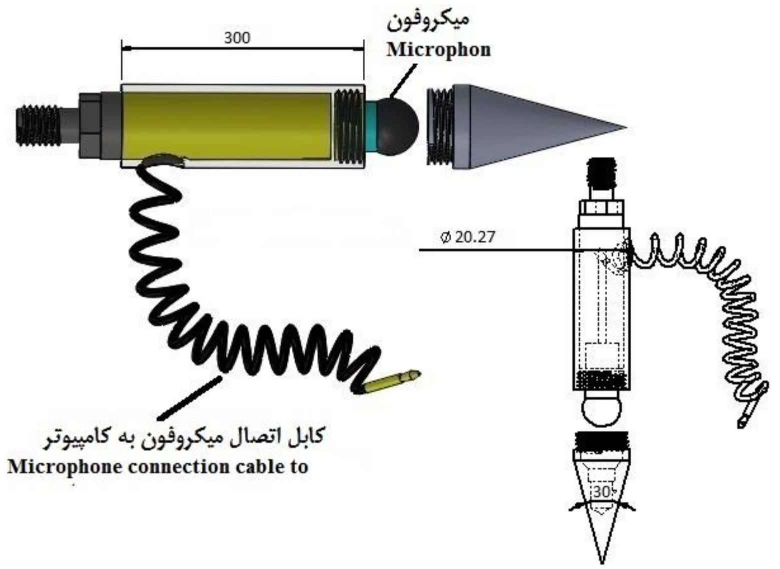
یک نفوذسنج مخروطی صوتی (ACPT)[1] به‌منظور تعیین این‌که آیا رابطه‌ای بین صدای تولیدشده در سطح مشترک مخروط و خاک و اندازه ذرات خاک وجود دارد، طراحی شده است. مخروط‌ها طبق استاندارد (R2013) ASAE S313.3 FEB1999ED با قطر ۲۰/۲۷ میلی‌متر و با سه زاویه ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه، طول میله ۳۰۰ میلی‌متر و از فولاد ۱۰۴۵ و با روش ماشین‌کاری برای تعیین ارتباط صدا و شاخص مخروطی و انتخاب بهترین زاویه استفاده شد (Anonymous, 2013).

1- Acoustic Cone Penetrometer Test

جدول ۱- نمونه‌های بافتی و رطوبت خاک‌های جمع‌آوری‌شده
Table 1-Texture and moisture samples of collected soils

نمونه‌های خاک Soil sample	شماره آزمایش Test number	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	بافت خاک Texture class	رطوبت Moisture (%)
South of Piranshahr (جنوب پیرانشهر)	1-20	42	32	25	Loam	10
East of Piranshahr (شرق پیرانشهر)	21-40	22	36	42	Clay	11
North of Piranshahr (شمال پیرانشهر)	41-60	88	8	4	Sand	10.5

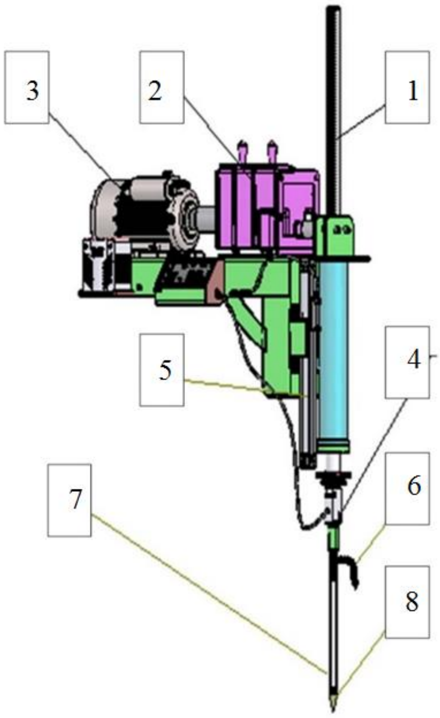
به‌منظور ضبط سیگنال‌های صوتی تولیدشده از خاک، از یک میکروفون (VM-034CY) استفاده شد که دارای پاسخ فرکانسی از ۲۰ تا ۲۰۰۰۰ هرتز، حساسیت مدار باز $mv.Pa^{-1}$ ۴/۲، حساسیت مکانیکی $nm.Pa^{-1}$ ۱/۵ و برای پاسخ‌های دینامیکی سریع بسیار مناسب است. سرعت نفوذ مخروط با ستفاده از اینورتور ۵/۵ کیلووات، که کنترل موتور را به‌صورت برداری بدون سنسور، کنترل ولتاژ و فرکانس انجام می‌دهد، مطابق با استاندارد نفوذسنج مخروطی (ASABE (EP542 روی ۳۰ میلی‌متر بر ثانیه تنظیم شد. همچنین فرکانس نمونه‌برداری ۴۸۰۰۰ هرتز و مدت زمان داده‌برداری روی ۱۰ ثانیه تنظیم شد. برای به حداقل رساندن صدای الکتروموتور و محیط، میکروفون داخل مخروط توسط ژل مخصوص ابتدا آغشته شده سپس همراه با یک حلقه لاستیکی در داخل و نزدیک به نوک مخروط ثابت شد (شکل ۱). سیگنال‌های صوتی به‌صورت آنلاین از طریق بخش اسیلوسکوپ نرم‌افزار Matlab ذخیره می‌شوند.



شکل ۱- مخروط و اجزای آن طبق استاندارد (ASAE S313.3 FEB1999ED (R2013
Fig.1. Cone and its components according to ASAE standard S313.3 FEB1999ED (R2013), all values are in mm

برای ایجاد حرکت عمودی کنترل‌شده مخروط‌ها، یک مکانیزم مکانیکی با کنترل‌کننده‌های الکترونیکی طراحی شد. این مکانیزم قابل اتصال بر روی ریل‌های جعبه خاک (سویل بین) واقع در دانشگاه ارومیه است (شکل ۲).

در این سیستم از یک الکتروموتور ۵ اسب بخار دارای سرعت ۱۴۳۰دور در دقیقه در شفت خروجی، اینورتر برای کنترل سرعت دورانی الکتروموتور، خط‌کش دیجیتالی برای ثبت حرکت عمودی و یک جعبه دنده برای تبدیل حرکت استفاده شد. نمونه‌های خاک در داخل سطل‌های ۲۰ لیتری آزمایش شدند. هر نمونه خاک ده بار در مکان‌های مختلف درون سطل مورد آزمایش قرار گرفت. و پس از هر سه تکرار، دوباره به حالت اولیه برگردانده می‌شود. این تعداد آزمایش بیشترین تکرار را در هر سطل بدون نمونه‌برداری نزدیک به نمونه قبلی و دیواره سطل ارائه می‌دهد.



شکل ۲- مکانیزم حرکت عمودی و کنترل‌شده مخروط‌ها؛ ۱- چرخ‌دنده شانه‌ای، ۲- جعبه‌دنده، ۳- موتور الکتریکی، ۴- لودسل، ۵- خط‌کش دیجیتالی، ۶- سیم اتصال میکروفون به کامپیوتر، ۷- میله و ۸- مخروط

Fig.2. Mechanism of vertical and controlled movement of cones; 1- Rack and pinion gear, 2- Gearbox, 3- Electric motor, 4- Load cell, 5- LVDT, 6- Microphone connection cable to the computer, 7- Rod, and 8- Cone




شکل ۳- شماتیک دستگاه و سیستم ثبت سیگنال‌های صوتی

Fig.3. Test setup of the device and audio data recording system

پردازش سیگنال

سیگنال‌های صوتی دریافتی از مخروط‌ها (سه مخروط با زاویه‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه و سه نوع بافت خاک) در حوزه فرکانس زمانی با استفاده از تبدیل موجک پردازش شدند. در تبدیل موجک، سیگنال از یک سری فیلتر بالاگذر و پایین‌گذر عبور می کند. سیگنال به دو بخش تقسیم می‌شود. بخشی که از یک فیلتر بالاگذر عبور می‌کند، حاوی داده‌های فرکانس بالا یعنی نویز است که به آن جزئیات می‌گویند. بخش دوم که از یک فیلتر پایین‌گذر عبور می‌کند که حاوی داده‌های فرکانس پایین و شامل ویژگی‌های سیگنال است و تقریب نامیده می‌شود. به‌طور کلی، اگر $x(t)$ سیگنال اصلی باشد و

با استفاده از موجک به n سطح تجزیه شود، اولین سیگنال را می توان از مجموع سیگنال های تقریبی در آخرین سطح و مجموع توابع جزئیات در سطوح مختلف طبق رابطه (۱) به‌دست آورده و آن را محاسبه نمود (Zanardelli, Strangas, Khalil, & Miller, 2005; Soman, 2010):

$$X(n) = a_n(n) + \sum_{n=1}^{N} d_n(n) \qquad (۱)$$

که در آن a_n تقریبات سیگنال و d_n جزئیات سیگنال هستند. عملیات تجزیه در تبدیل موجک را می‌توان تا زمانی ادامه داد که داده‌های قابل‌توجهی در تقریب وجود نداشته باشد. بنابراین، اولین سیگنال را می‌توان با استفاده از سیگنال‌های جزئیات بدون از دست دادن داده‌های ضروری بازسازی کرد. انتخاب نوع تابع برای مسائل مختلف در تبدیل موجک متفاوت است. تابع داوبچی Daubechi (DB3) در بیشتر مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است. کارایی تابع داوبچی تایید شده است. از این رو تابع مذکور در این تحقیق برای تجزیه سیگنال‌های صوتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تابع داوبچی با ۵ سطح تجزیه پس از تلاش و خطا انتخاب شد. بنابراین، سیگنال را می‌توان به‌صورت رابطه (۲) نوشت، ([d1-d5 جزئیات، a5 تقریبی و x[n] سیگنال اصلی است):

$$X(n) = a5 + d5 + d4 + d3 + d2 + d1 \qquad (۲)$$

استفاده از سیگنال‌های صوتی پردازش‌شده به‌صورت مستقیم در تجزیه و تحلیل آماری امکان‌پذیر نیست. به همین دلیل باید اقدام به استخراج ویژگی‌های مختلف کرده و ویژگی‌های مناسب را انتخاب نمود. در مجموع ۳۰ ویژگی طی فرآیند پردازش سیگنال استخراج شد (جدول ۲). بدیهی است که تعداد زیاد ویژگی‌ها باعث افزایش حجم محاسبات و در نتیجه کاهش سرعت پردازشگر و افزایش خطا خواهد شد. بنابراین می‌توان با رتبه‌بندی ویژگی‌ها از لحاظ تاثیر و اهمیت، ویژگی‌های موثرتر را انتخاب کرد و مورد بررسی قرار داد. بر این اساس، با استفاده از بخش انتخاب ویژگی نرم‌افزار WEKA 3.9.2، ویژگی‌های موثرتر و اصلی انتخاب شدند که شامل هفت ویژگی، مقدار مجموع (SUM)، ماکزیمم (Max)، ریشه میانگین مربعات (RMS)، میانگین (Mean)، واریانس (Var)، کشیدگی (kurtosis) و ممان‌های مرتبه بالا (Moment4) سیگنال ها می‌باشد.

برای تشخیص سیگنال‌های مربوط به چند بافت مختلف و در نهایت برای تشخیص تفاوت بین این سه نوع بافت، باید بردار مشخصه سیگنال های فرعی را انتخاب کرد و با توجه به تغییرات این بردارها، بافتها را از هم متمایز کرد. در این مطالعه از مجموع، ریشه میانگین مربعات، واریانس، کشیدگی و ممان‌های مرتبه بالا برای مقایسه سیگنال‌های خروجی سه نوع بافت خاک با سه مخروط استفاده شد.

جدول ۲– ۳۰ ویژگی استخراج‌شده از سیگنال‌های صوتی

Table 2- 30 features extracted from audio signals

1	Max	7	Rms	13	Moment6	19	CF	25	Max/s
2	Sum	8	Skew	14	Entr	20	IF	26	Sqr/s
3	Meany	9	Kurtosis	15	Energ	21	Mom/POW2	27	Max/mea
4	Meanaby	10	Moment3	16	Geom	22	Rm/me	28	s16/s1
5	Var	11	Moment4	17	Har	23	Mom/POW3	29	y3
6	Std	12	Moment5	18	FM4	24	POW2	30	y4/POW

مجموع (Sum)

مجموع عبارت است از دامنه کل نقاط داده‌های سیگنال صوتی، که می‌تواند شدت سیگنال صوتی را نشان دهد و به‌صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود (Lei, He, & Zi, 2008):

$$Sum = \sum_{n=1}^{N} x(n) \qquad (۳)$$

که در آن x(n) دامنه نقاط و N تعداد نقاط داده‌های سیگنال است.

میانگین (Mean)

هرچه مقدار متوسط به صفر نزدیک شود، تقارن سیگنال افزایش می‌یابد. از آن‌جایی‌که سیگنال‌های ارتعاشی و صوتی به‌صورت موجی هستند، مقدار سیگنال معمولاً صفر است. بنابراین برای استفاده از این فاکتور تابع قدرمطلق آن محاسبه می‌شود. (رابطه (۴)) (Lei *et al.*, 2008):

$$Mean\ (abs) = \frac{\sum_{n=1}^{N} abs(x(n))}{N} \qquad (۴)$$

واریانس (VAR)

این فاکتور معمولاً پراکندگی سیگنال را نشان می‌دهد. هرچه واریانس بزرگ‌تر باشد، سیگنال دارای پراکندگی بیشتری است. به‌عبارت دیگر، صدای دریافتی ناسازگاری بیشتری دارد (Lei *et al.*, 2008).

$$Var(x(n)) = \frac{\sum_{n=1}^{N}(x(n)) - mean(x(n)))^2}{N-1} \qquad (۵)$$

ریشه میانگین مربعات (RMS)

یکی از رایج‌ترین پارامترهای مورد استفاده در تجزیه و تحلیل

سیگنال‌های صوتی، ریشه میانگین مربعات است. زیرا مهم‌ترین ویژگی یک سیگنال صوتی مقدار انرژی آن است. انرژی متناسب با دامنه سیگنال است و میانگین توان دوم سیگنال صوتی از قدرت سیگنال صوتی مناسب‌تر است. ریشه میانگین مربعات به‌صورت رابطه (۶) محاسبه می‌شود (Mohammed, Rantatalo, Aidanpää, & Kumar, 2013):

$$RMS = \left[\frac{\sum_{n=1}^{N}(x(n))^2}{N}\right]^{1/2} \quad (۶)$$

که در آن x(n) دامنه نقاط داده و N تعداد نقاط داده‌های سیگنال است.

کشیدگی (kurtosis)

کشیدگی میزان برجستگی قله را در توزیع یک مجموعه داده مشخص می‌کند. در واقع، کشیدگی بزرگ‌تر نشان می‌دهد که پالس‌های سیستم بزرگ‌تر دارای توالی بزرگ‌تر، تیزتر و گسترده‌تر هستند و برای تشخیص عیوب ریزساختارها استفاده می‌شود. وجود عیوب ریز در یک سازه باعث افزایش اعوجاج سیگنال و افزایش میزان سیگنال کشیدگی می‌شود. مقدار کشیدگی برای سیگنال x (n) با تعداد N داده، به‌صورت رابطه (۷) محاسبه می‌شود (Mohammed *et al.*, 2013):

$$Kurtosis = \frac{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} x(n)^4}{\left[\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} x(n)^2\right]^2} \quad (۷)$$

ممان (Momentum)

این فاکتور مقدار نرمال‌شده سیگنال را نسبت به میانگین نشان می‌دهد و عامل مناسبی برای بررسی وضعیت ضربه سیگنال است (Khazaee, Ahmadi, Omid, Banakar, & Moosavian, 2013)

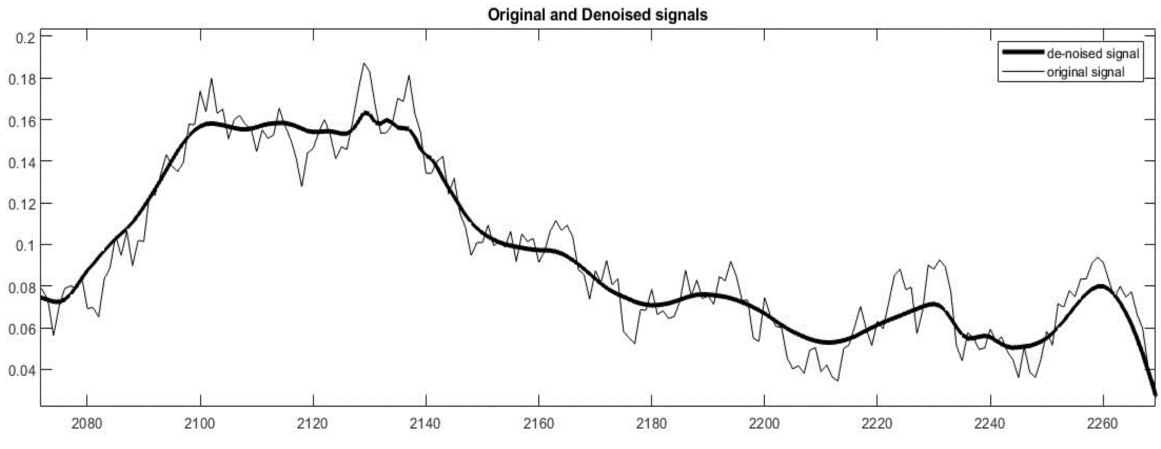
$$Moment\ (4) = \frac{\sum_{n=1}^{N}(x(n)) - Mean(x(n)))^4}{N} \quad (۸)$$

تحلیل آماری

آزمون برای هر نرخ با ۲۰ تکرار انجام شد و در مجموع ۱۸۰ سیگنال به‌دست آمد. پردازش سیگنال با استفاده از نرم‌افزار MTLAB انجام شد. از روش دانکن برای مقایسه میانگین‌ها با احتمال ۱٪ و ۵٪ استفاده شد. برای تجزیه و تحلیل آماری از نرم‌افزار SPSS 18 استفاده شد.

نتایج و بحث

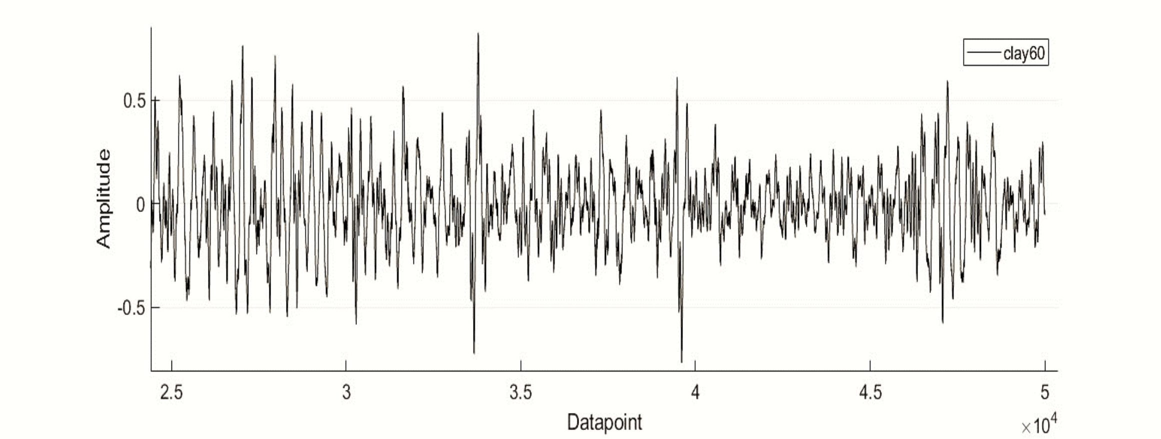
در ابتدا، داده‌های سیگنال که شامل سیگنال‌های اضافی صوتی ناشی از صدای محیط، الکتروموتور و جعبه‌دنده است با استفاده از فیلترهای دیجیتالی در تبدیل موجک نرم‌افزار متلب، فیلتر شدند. با این روش موثر سیگنال‌های صوتی استحصال‌شده از خاک به دلیل وجود نویزهای صوتی محیط، الکتروموتور و دستگاه فیلتر شدند و تا حد امکان سیگنال‌های صوتی خاک خالص شدند. شکل ۴ مقایسه توزیع فرکانس دو سیگنال قبل و بعد از فیلتر را نشان می‌دهد.



شکل ٤- سیگنال‌های صوتی قبل و بعد از فیلتر کردن و مقایسه آن‌ها در حوزه زمان

Fig.4. Audio signals before and after filtering and comparing them in the time domain

در شکل ۵، یکی از سیگنال‌های برداشت‌شده در حوزه زمان مربوط به سه نوع خاک و با سه نوع زاویه مخروط به‌عنوان نمونه نشان داده شده است.

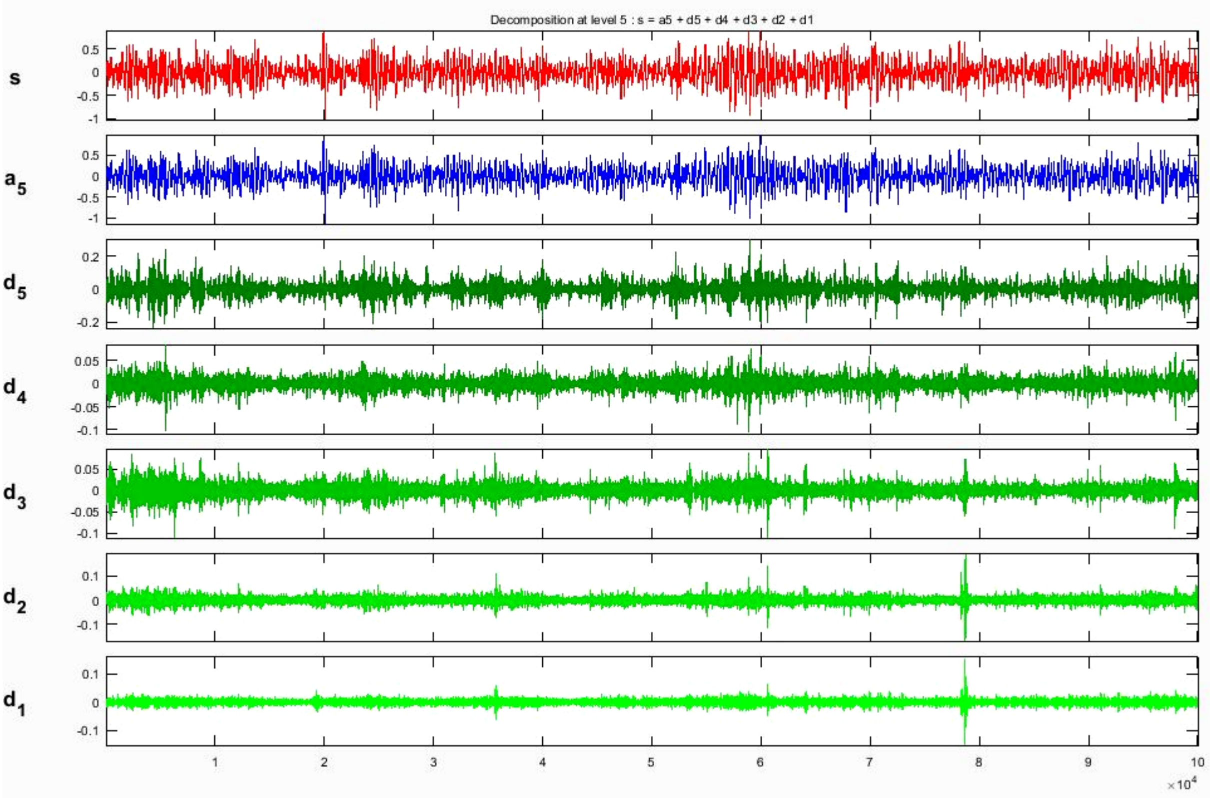


شکل ۵- نمونه‌ای از وضعیت سیگنال‌های صوتی برای خاک با بافت رسی و مخروط ۶۰ درجه

Fig.5. An example of acoustic signal condition for clay texture soil with a 60-degree cone

همان‌طور که از شکل ۵ مشخص است بررسی ظاهری سیگنال‌های صوتی در حوزه زمان اطلاعات مفیدی را در رابطه نوع خاک و نوع مخروط به‌دست نمی‌دهد و نمی‌تواند ارزیابی دقیقی را از وضعیت سیگنال‌ها انجام دهد؛ بنابراین برای بررسی دقیق‌تر وضعیت سیگنال‌ها از تبدیل موجک برای تجزیه آن‌ها استفاده شد.

شکل ۶ یک نمونه از زیرسیگنال‌های deatails و approximate برای خاک رسی با مخروط ۳۰ درجه را نشان می‌دهد.



شکل ٦- نمونه‌ای از سیگنال‌های تجزیه‌شده جزئیات (deatails) و تقریبات (approximate) خاک رس با مخروط ۳۰ درجه

Fig.6. An example of the detailed and approximate sub-signals of clay with a 30-degree cone

انتخاب بهترین مخروط

برای انتخاب بهترین نوع مخروط از قسمت انتخاب ویژگی در نرم‌افزار WEKA استفاده شد و همان‌طور که در جدول ۳ قابل مشاهده است ویژگی‌های اولویت‌داده‌شده در زیرسیگنال‌های d_1 برای مخروط 45°، d_1 برای مخروط 60°، d_3 برای مخروط 60° و a5 برای مخروط 45°، دارای تعداد بیشتری بود و می‌توان نتیجه گرفت که زیرسیگنال d1 با مخروط ۴۵ درجه، قابلیت بیشتری برای تفکیک نوع بافت خاک خواهد داشت.

جدول ۳- نتایج اولویت‌بندی ویژگی‌های زیرسیگنال‌های جزئیات و تقریبات

Table 3- The results of prioritizing the features under detail signals and proximates

زیرسیگنال‌ها Sub-Signal	زاویه مخروط Cone type	اولویت‌بندی ویژگی‌ها Prioritize features
	30°	Max
d1	45°	Sum- mean- var- moment4- RMS-kurt- max
	60°	Sum- meanaby- moment4
	30°	Max-Var
d2	45°	Sum
	60°	max
	30°	Max
d3	45°	Sum
	60°	Max- kurt- moment4- moment6- CF
	30°	Max
d4	45°	Max
	60°	Max- moment4
	30°	Max
d5	45°	Max
	60°	Max- sum
	30°	Max
a5	45°	Moment6- max/s- sum- mean
	60°	M0ment6

جدول ٤– نتایج تجزیه واریانس ویژگی‌های سیگنال‌های صوتی d1 برای تفکیک بافت خاک

Table 4- The results of variance analysis of acoustic signal characteristics d1 for soil texture separation

ویژگی‌ها Properties	نوع خاک Soil type	میانگین Mean	انحراف معیار Standard deviation	مجموع مربعات Sum of squares	آزمون F	سطح معنی‌داری Sig.
مجموع Sum	clay	16.403	1.107			
	loam	18.755	1.486	145.271	22.141	0.001
	sand	23.2501	2.532			
میانگین Mean	clay	0.002909	0.000197			
	loam	0.003439	0.000389	0.000	17.045	0.001
	sand	0.004123	0.000449			
واریانس VAR	clay	0.0000154	0.00000225			
	loam	0.00002072	0.0000055999	0.000	12.028	0.001
	sand	0.00002998	0.000006724			
ممان مرتبه بالا MOMENT4	clay	0.00000000158	0.00000000099			
	loam	0.00000000253	0.00000000211	0.000	3.356	0.050
	sand	0.000000004394	0.00000000238			
ریشه میانگین مربعات RMS	clay	101.00922	0.6671			
	loam	97.07258	0.9039	46.584	19.061	0.010
	sand	99.19299	1.551			
کشیدگی Kurt	clay	6.8079	2.1825			
	loam	6.5549	1.6303	5.571	2.247	0.050
	sand	5.0269	1.2829			
ماکزیمم Max	clay	0.0289	0.002393			
	loam	0.0549	0.01753	0.003	6.868	0.010
	sand	0.0579	0.01876			

بنابراین، این زیرسیگنال‌ها را به‌عنوان زیرسیگنال‌های مورد بررسی انتخاب و از تحلیل بقیه زیرسیگنال‌ها چشم‌پوشی شد و نهایتا مخروط °45 به‌عنوان بهترین مخروط برای این کار انتخاب شد.

به‌منظور تشخیص تفاوت در سیگنال‌های بافت خاک با استفاده از زیرسیگنال‌ها، از هفت ویژگی مجموع، ماکزیمم، میانگین، واریانس، کشیدگی و ممان استفاده شد. مقایسه تجزیه واریانس این ویژگی‌ها در سطح احتمال ۱٪ و ۵٪ در جدول ۳ ارائه شده است.

طبق جدول ۴، زیرسیگنال‌های جزییات با احتمال ۱٪ و ۵٪ با استفاده از تمام ویژگی‌های انتخاب‌شده، می‌تواند انواع بافت خاک را تشخیص دهد.

از نظر اندازه ذرات، خاک درشت و سبک را خاک شنی و خاک ریز و سنگین را خاک رسی می‌گویند. خاک لوم (loam) ما بین این دو نوع و دارای مخلوط مناسبی از شن و سیلت و رس است. همان‌طور که از جدول ۴ قابل مشاهده است مقادیر میانگین ویژگی‌ها در انواع خاک به‌ترتیب از خاک رسی، لومی و شنی با احتمال معنی‌داری ۱٪ و ۵٪ روندی افزایشی دارد که این تغییرات نشان‌دهنده این است که سیگنال‌های صوتی برای خاک رسی که دارای بافتی سنگین و ذرات کوچکی است، دارای دامنه حداقل و برای خاک لومی و شنی به‌ترتیب به‌صورت متوسط و حداکثر مشاهده شدند. این امر باعث کم بودن مقادیر ویژگی‌های انتخاب‌شده و به تبع آن مقادیر میانگین و واریانس و انحراف معیار برای خاک رسی خواهد شد و برای خاک لومی و شنی که دارای ذرات به‌ترتیب بزرگ‌تری هستند، بیشتر خواهد شد. بدین صورت که با بزرگ شدن اندازه ذرات خاک، برخورد به دیواره مخروط سنگین‌تر شده و روی فرکانس و دامنه سیگنال تاثیر خواهد گذاشت که باعث افزایش مقادیر دامنه سیگنال و در نتیجه افزایش ماکزیمم، مجموع و میانگین خواهد شد.

روند مذکور در جریان نفوذ مخروط داخل خاک و تماس خاک و مخروط و سیگنال‌های صوتی به‌دست‌آمده از آن تاثیر مستقیمی در روند تغییرات ویژگی‌های دیگر نیز خواهد داشت. به‌طوری‌که در مورد ویژگی واریانس، باید گفت که در خاک رس، پراکندگی سیگنال پایین بوده و با افزایش اندازه ذرات خاک، مقدار پراکندگی نیز افزایش می‌یابد.

افزایش کشیدگی (kurt) سیگنال در خاک‌های با اندازه ذرات کوچک‌تر، احتمالا نشانگر این است که مقدار اکسترمم‌های سیگنال در حال زیاد شدن است که موجب نازک شدن قله سیگنال خواهد بود و کاهش کشیدگی سیگنال در خاک‌های با اندازه ذرات بزرگ‌تر، بیانگر کاهش مقادیر اکسترمم‌های سیگنال و در نتیجه پهن شدن مجدد قله آن خواهد شد.

مقدار ممان (moment) سیگنال در خاک‌های با ذرات بزرگ‌تر به دلیل برخورد شدیدتر ذرات با مخروط، افزایش داشت و به عبارت دیگر حالت ضربه‌ای سیگنال افزایش پیدا می‌کند و در خاک‌های با اندازه کوچک‌تر به علت تراکم بالای ذرات و برخورد پیوسته ذرات با دیواره مخروط، مقدار آن کاهش پیدا می‌کند.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، پتانسیل تکنیک تحلیل سیگنال صوتی برای تعیین نوع بافت خاک مورد ارزیابی قرار گرفت. سیگنال‌های صوتی سه نوع بافت خاک با سه مخروط شامل خاک رسی، خاک لومی و خاک شنی با سه زاویه مخروط ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه توسط میکروفون جاگذاری شده داخل مخروط‌ها اندازه‌گیری شد. سپس برای تشخیص اختلاف معنی‌دار بین سیگنال بافت‌های خاک، سیگنال‌ها با استفاده از تبدیل موجک به ۵ سیگنال فرعی تجزیه شدند و برای هر کدام از زیر سیگنال‌ها ۷ ویژگی شامل: مجموع، میانگین، واریانس، ریشه میانگین مربعات، کشیدگی، ماکزیمم و ممان استخراج‌شده و با هم مقایسه شدند. نتایج اصلی کار حاضر را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

۱. در بین سیگنال‌های فرعی (زیرسیگنال‌ها)، حداکثر اثر تغییرات نوع بافت خاک به‌ترتیب مربوط به زیر سیگنال d1 برای مخروط ۴۵ درجه، زیر سیگنال d1 برای مخروط ۶۰ درجه، زیر سیگنال d3 برای مخروط ۶۰ درجه و زیر سیگنال a5 برای مخروط ۴۵ درجه بود و این زیر سیگنال‌ها پتانسیل بیشتری برای شناسایی نوع بافت خاک داشتند.
۲. از میان ویژگی‌ها، تأثیر نوع بافت خاک بر ویژگی‌های (مجموع، میانگین، واریانس و ریشه میانگین مربعات) در زیرسیگنال d1 برای مخروط °45 ، در سطوح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود. بنابراین، این ویژگی‌ها در زیرسیگنال مذکور پتانسیل بیشتری برای تشخیص نوع بافت خاک دارند. همچنین تأثیر تغییر بافت خاک بر ویژگی‌های ممان و کشیدگی در سطوح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود.
۳. به‌جز ویژگی کشیدگی همه ویژگی‌ها با افزایش اندازه ذرات خاک به‌ترتیب رس، لوم و شن افزایش یافت که به دلیل تقویت فرکانس‌های سیگنال صوتی و افزایش صدای دریافتی توسط میکروفون است.

در طول سال‌ها، تکنیک‌های سنجش مختلفی برای اندازه‌گیری نوع بافت خاک توسعه و پیشنهاد شده‌اند. این روش‌ها در کاربرد صنعتی محدود هستند، زیرا یا نسبت به تغییر محیط حساس هستند و یا هزینه‌بر و زمان‌بر هستند. اما، تجزیه و تحلیل سیگنال‌های صوتی به دلیل مزایای آن مانند ارتباط فرکانس بهینه با اندازه ذرات، سادگی روش، استحکام در برابر شرایط دشوار، نصب آسان، نمایش آنلاین، هزینه تجهیزات و نگهداری کم، جذاب است. همچنین نتایج این

مطالعه عملکرد این تکنیک را نشان داد. بنـابراین، تکنیـک تجزیـه و تحلیل سیگنال صوتی پتانسیل زیادی برای تشخیص نوع بافت خـاک دارد.

References

1. Anonymous. (2013). ASABE, S313.3 feb1999ed (r), Soil cone penetrometer. *American Society of Agricultural and Biological Engineers.*
2. Chang, H. W., Chang, T. H., Nguyen, V. T., & Wang, C. W. (2010), Determination of interfaces in soil layers by sound wave analysis with cone penetration tests. *Journal of Marine Science and Technology*, *18*(5), 664-673. https://doi.org/10.51400/2709-6998.1909
3. Grift, T., Tekeste, M., & Raper, R. (2005), Acoustic compaction layer detection. *Transactions of the ASAE*, *48*(5), 1723-1730. https://doi.org/10.13031/2013.20006
4. Hemmat, A., Rahnama, T., & Vahabi, Z. (2014), A horizontal multiple-tip penetrometer for on-the-go soil mechanical resistance and acoustic failure mode detection. *Soil and Tillage Research*, *138*, 17-25. https://doi.org/10.1016/j.still.2013.12.003
5. Houlsby, G. T., & Ruck, B. M. (1998). Interpretations of signals from an acoustic cone penetrometer. *Site Characterization: Geotechnical Site Characterization*, 1075-1080.
6. Khazaee, M., Ahmadi, H., Omid, M., Banakar, A., & Moosavian, A. (2013), Feature-level fusion based on wavelet transform and artificial neural network for fault diagnosis of planetary gearbox using acoustic and vibration signals. *Insight-NonDestructive Testing and Condition Monitoring*, *55*(6), 323-330. https://doi.org/10.1784/insi.2012.55.6.323
7. Lei, U., He, Z., & Zi, Y. (2008). A new approach to intelligent fault diagnosis of rotating machinery. *Expert Systems with Applications*, *35*, 1593-1600. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.08.072
8. Meisami-asl, E., Shari, A., Mobli, H., Eyvani, A., & Alimardani, R. (2013). On-site measurement of soil moisture content using an acoustic system. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, *15*(4), 1-8.
9. Mohammed, O. D., Rantatalo, M., Aidanpää, J. O., & Kumar, U. (2013). Vibration signal analysis for gear fault diagnosis with various crack progression scenarios. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *41*, 176-195. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.06.040
10. Naderi-Boldaji, M., Tekeste, M. Z., Nordstorm, R. A., Barnard, D. J., & Birrel, S. J. (2019). A mechanical-dielectric- high frequency acoustic sensor fusion for soil physical characterization. *Computer and Electronics in Agriculture*, *156*, 10-23. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.11.006
11. Posadas, A. N. D., Giménez, D., Bittelli, M., Vaz, C. M. P., & Flury, M. (2001). Multifractal characterization of soils particlesize distributions. *Soil Science Society of America Journal*, *65*, 1361-1367. https://doi.org/10.2136/sssaj2001.6551361x
12. Soman, K. P. (2010). *Insight into wavelets: from theory to practice*, PHI Learning Pvt. Ltd., Wavelets (Mathematics).
13. Sun, Y., Druecker, H., Hartung, E., Hueging, H., Cheng, Q., Zeng, Q., Sheng, W., Lina, J., Roller, O., Paetzold, S., Schulze Lammers, P., (2011). Map-based investigation of soil physical conditions and crop yield using diverse sensor techniques. *Soil and Tillage Research*, *112*(2), 149-158. https://doi.org/10.1016/j.still.2010.12.002
14. Tate, B. L. (2016). *Soil texture determination by an acoustic cone penetrometer method*. Master thesis. University of Illinois at Urbana-Champaign, USA.
15. Tringale, P. T. (1983). *Soil identification in-situ using an acoustic cone penetrometer*. Ph.D. dissertation, University of California, Berkeley.
16. Zanardelli, W. G., Strangas, E., Khalil, H. K., & Miller, J. M. (2005). Wavelet-based methods for the prognosis of mechanical and electrical failures in electric motors. *Mechanical Systems and Processing Signal*, *19*(2), 411-426. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2003.10.002